

降雨予測リードタイムの延長による多目的ダムの弾力的管理の向上

その他（別言語等） のタイトル	RESEARCH ON IMPROVEMENT OF FLEXIBLE DAM OPERATION BASED ON EXTENDED FORECAST RAINFALL
著者	林下 直樹，中津川 誠，臼谷 友秀
雑誌名	土木学会論文集B1（水工学）
巻	70
号	4
ページ	I_1471-I_1476
発行年	2014
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009747

doi: info:doi/10.2208/jscejhe.70.I_1471

降雨予測リードタイムの延長による 多目的ダムの弾力的管理の向上

RESEARCH ON IMPROVEMENT OF FLEXIBLE DAM OPERATION BASED ON EXTENDED RAINFALL FORECAST

林下直樹¹・中津川誠²・臼谷友秀³

Naoki HAYASHISHITA, Makoto NAKATSUGAWA, and Tomohide USUTANI

¹学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

²正会員 博士(工学) 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

³正会員 一般財団法人 日本気象協会 北海道支社 (〒064-8555 札幌市中央区北4条西23丁目)

This study investigates small-scale hydropower generation utilizing the dam water currently released solely for maintaining the river discharge. Toward improving such small-scale hydropower generation, a method for flexible operation of dams is proposed. In flexible operation, a portion of the flood control capacity is allocated to water storage. When a flood is forecasted, it is necessary to release that amount of water to recover the dam's flood control capacity. In conducting such release, accurate forecasting with sufficient lead time is desirable. This study examined the possibility of determining the necessity of water release ahead of forecasted rainfall by estimating the amount of water flowing into the dam reservoir based on forecasted cumulative rainfall computed from numerical weather prediction models (RSM and GSM). The examinations clarified that by employing the proposed method it would be possible to secure water which is about 8 times that currently used for power generation.

Key Words: multi-purpose dam, flexible dam operation, rainfall forecast, cumulative forecasted rainfall

1. はじめに

著者ら¹⁾は、北海道の金山ダムにおいて4月～10月に行われている維持放流(流量0.3m³/s)を対象として小水力発電の可能性を検討している。既設ダムを利用するため環境負荷、コストの削減が可能であり、また落差を十分に稼ぐことができる利点がある一方で、発電に利用する水量の確保を課題としており、適切な水管理が必要となる。ダムの機能向上に関して、下坂ら²⁾は時々刻々の累積降雨量や流入量から、それ以降ダムに最低限流入する水量を事前放流することで、洪水時に治水機能を向上させることができるという報告をしている。また臼谷ら³⁾は、積算予測雨量に基づくダムの操作方法を提案し、事前放流によって但し書き操作が回避可能であるという報告をしている。

著者らは前報⁴⁾において降雨予測を用いることでダムの弾力的管理を合理的に判断する方法論を論じた。弾力的管理とは、洪水に対する安全性を確保しつつ利水容量

の増量を図る運用のことで、これによって小水力発電実施時に見込まれる発電電力量を増加させるかどうかを検討した。洪水への対策には、数値予報モデル(RSM, GSM)による予測雨量を用いた放流操作方法を提案し、結果として水量約2,700千m³の利水容量が確保可能であるということを示した。発電を実施した場合、7月～9月の期間限定ではあるが、現況では1日当たり約1,240kWh、水量を確保した場合では約2,520kWhと約2倍の発電量を得られることを示した。本報では、降雨予測のリードタイム(以下LTで表記する。)を延長し、弾力的管理のさらなる向上策について提案する。手順を以下に示す。

- 1) 金山ダム流域において、予測値と実績値の相関係数を評価指標とし、予測LTを延長した場合の予測雨量の精度を検証した。
- 2) 積算予測雨量に対する積算実績雨量にガンマ分布を適用し、予測値の誤差幅と補正式を算定した。
- 3) 降雨予測LTを延長した積算予測雨量を用いたダムの事前放流操作方法を提案し、過去の洪水事例に適用して安全性を検証した。

2. 対象ダムの概要

解析の対象としたのは図-1に示す金山ダムである。金山ダムでは、ダム直下の河川環境改善のため維持放流が実施されており、4月1日～10月31日は日中6時～19時、7月1日～9月30日は夜間19時～6時の時間帯で放流されている。放流量は共に $0.3\text{m}^3/\text{s}$ である。ここで夜間の維持放流はダムの弾力的管理によって確保された水量を基に放流されている。ダムの弾力的管理とは、下流の河川環境の保全を目的とし、洪水期に設けられている治水容量の一部に流水を貯留し（活用容量）、放流する行為をいう⁹⁾。洪水前には治水容量を確保するため、事前放流を行う（図-2）。金山ダムでは、旭川地方気象台から上川南部への大雨注意報の発令を事前放流の基準としている。本研究では、降雨予測LTを延長し長時間先の流入量を予測することにより、ダムの弾力的管理による活用容量をさらに増大させることを考えた。

3. LTIに応じた予測雨量の精度

ダム管理において、今後貯水池に流入する水量をより早期に、より正確に予測することは的確な準備作業を行うため重要な情報となる。一般に総雨量と総流出量には対応関係があることから、LTが長く、精度のよい降雨予測が可能であれば、早い段階からダムへの流入量を予測することができる。しかしRSM・GSMの予測値は実績値を過少評価している場合が多く^{3),4)}、利用する際には補正が必要となる。その際、両者に相関があることが不可欠である。以下ではLTに応じた予測雨量の精度を相関係数で評価し、予測値の誤差について算定を行う。

(1) 基礎資料

予測雨量は、気象庁から配信されている数値予報モデルの一種であるRSMおよびGSMによる予測値を用いた。RSMは2007年11月で廃止されており、それ以降は日本域を対象としたGSMが運用されている。両モデルの諸元



図-1 金山ダム流域と雨量観測所

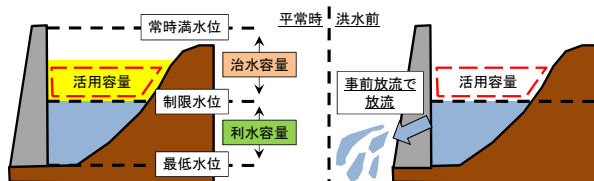


図-2 ダムの弾力的管理の模式図

を表-1に示す。実績値には金山ダム流域の6地点で観測されているテレメータ雨量を用いた（図-1参照）。

精度評価の対象とした降雨事例は、2002年から2012年の6月～10月の期間で、ダムへの流入が洪水量($80\text{m}^3/\text{s}$)に達した事例から、流域内の観測所のいずれかで日雨量が 70mm を超えた事例とした（表-2）。予測値のデータは事例日から前後3日間の計7日間のうちに配信されたものを使用した（2011/8/14は実際の降雨が長く8日間）。予測値と実績値はそれぞれ流域平均雨量に整理し比較する。RSM、GSMは流域の観測所が含まれる4メッシュを、実績値は流域の観測所6地点で観測されたテレメータ雨量をそれぞれ単純平均したものを流域平均雨量とした。

(2) 積算予測雨量と時系列予測雨量の精度比較

精度の比較には予測値と実績値の相関係数を評価指標として用いる。RSM、GSMそれぞれのLTを最長とした場合の相関係数について評価を行う。ここで、RSM、GSMはそれぞれ51時間、84時間先までの予測値を配信するが、配信間隔の点から毎時間確保できるLTを考えると、RSMは40時間、GSMは79時間が最長LTとなる。RSM、GSM別に、時系列値と積算値の相関係数とLTの関係についてまとめたものを図-3に示す。相関係数の算出には、後述のダム操作に使用する値を基に、毎時間算出される予測値とそれに対応する実績値を全て用いた。なお、予測値と実績値が共に 0mm の場合は除いている。図によると、積算値についてはRSMがLTを延ばすことにより 0.8 以上まで増加し、GSMはあまり変化しないことがわかった。RSM、GSMいずれも積算値の相関係数が高く、使用に適していると考えられる。これは積算時間が長くなることにより、予測した降雨波形に誤差が生じても積算時間内で誤差が相殺されるからと考えられる。以上では、一度の配信データをずらしながら毎時間積算予測雨量を算出しているため、データの独立性が疑われる。そこで一度の配信で1つのデータペアを作成した場合の相関性を検証したが、概ね同様の結果を得た。

相関係数に着目した今回の検討では、GSMよりRSM

表-1 RSM、GSMの概要

	配信間隔	リードタイム	空間格子間隔
RSM	1日2回(9, 21時)	51時間	約20km
GSM	1日4回(3, 9, 15, 21時)	84時間	約20km

表-2 解析に用いた降雨事例

年	月/日	日雨量(mm)	観測所	数値予報モデル
2002	10/02	100	狩勝	RSM
2005	08/03	95	奥落合	〃
〃	08/22	141	幾寅	〃
〃	09/07	127	金山ダム	〃
2006	08/18	181	串内	〃
〃	10/07	93	串内	〃
〃	10/11	84	串内	〃
2008	08/03	71	奥落合	GSM
2010	08/12	81	串内	〃
〃	08/24	78	北落合	〃
2011	07/14	119	奥落合	〃
〃	08/14	116	奥落合	〃
〃	09/05	127	狩勝	〃
2012	09/10	134	北落合	〃

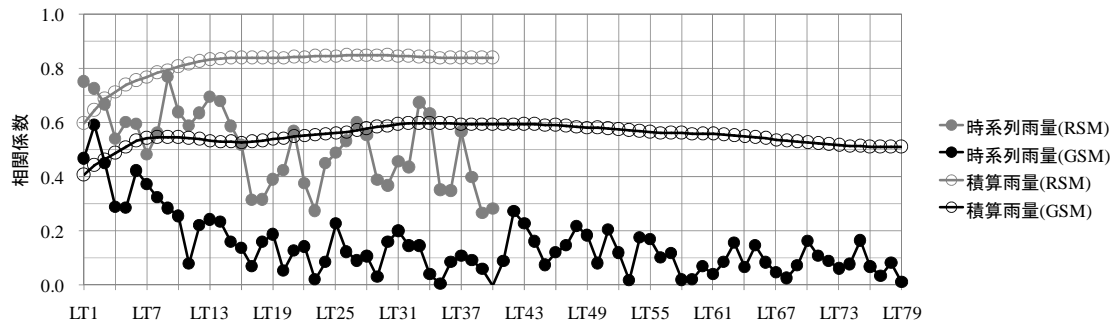


図-3 相関係数とLTの関係

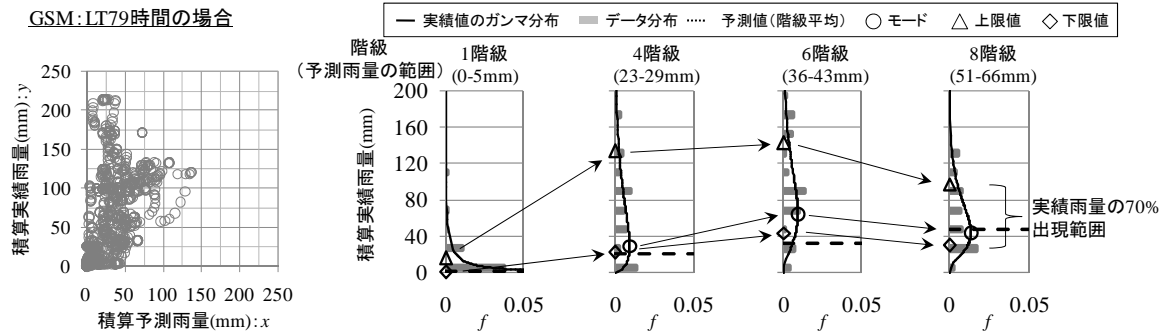


図-4 予測雨量と実績雨量の分布 (GSM, LT79時間) 左：相関図、右：階級ごとの分布

の方がより実績にあっているという結果となった。RSMの後継であるGSMにおいて予測精度が下がるようなことは考えにくい。またダム操作に関する技術検討会の中間報告書⁶⁾によると、GSMにおいてLTを延長した場合でも相関係数は0.8近い値を示している。対象流域の違いや両モデルの対象とした事例の降雨パターンの差異等、この点についてはさらなる検討が必要になる。しかし今回の解析データがまったくの無相関であるわけではなく、今回はこのようなデータを用いて検討を行った。

(3) 積算雨量の予測値と実績値との対応

積算予測雨量のLTを延長した場合でも、実績値との相関性を有することがわかったので、次に予測値の誤差の評価と補正式の作成を行う。手順は以下の通りである。

- 1) LT毎に予測雨量を数個の階級に分ける。
- 2) 階級毎に予測雨量に対する実績値にガンマ分布を適用し、予測雨量の階級平均、実績雨量のモード及び70%の出現幅を算出する。これは台風の中心が予報円に入る確率が70%であることを参考にした⁷⁾。
- 3) LT毎に全階級分を相関図にプロットし、回帰式を補正式とする。

以上の手順により、補正式を作成した。図-4はGSMのLTが79時間のときの予測値と実績値の相関図及び各階級の実績値にガンマ分布を適用したものである。階級は10個に分けたうちの1, 4, 6, 8階級について示している。データ数の多い0-5mmの区間を1階級として、2階級以降はデータ数が同じとなるようにした。誤差については、実績値の70%が出現する範囲を定めることで評価する。ガンマ分布の確率密度関数 $f(x)$ を積分し、次式を満足する r_{max} (上限値) と r_{min} (下限値) を求めればよい。

$$\text{上限値} : \int_0^{r_{max}} f(x)dx = 0.85 \quad (1)$$

$$\text{下限値} : \int_0^{r_{min}} f(x)dx = 0.15 \quad (2)$$

以上より求めた上限値、下限値及び予測雨量の階級平均、実績雨量のモードをガンマ分布に示している。図を見ると、6階級までは予測平均の増加に伴い上限値、下限値、モードも増加し対応関係が伺えるが、8階級ではそれぞれ減少している。ここで、ガンマ分布の形状及び70%出現範囲を比較すると、予測平均の増加に伴い出現範囲も広がっていたが、8階級では逆に狭くなっている。全般に予測雨量が大きくなるにつれ誤差は拡大する傾向があり³⁾、8階級についてはこれに反する。これは他の階級に比べ8階級に分類されたデータの分散が小さいためであり、全体に標本数が少ない可能性が考えられる。このような結果はRSMについては見られず、この点については前節で述べたように検討の余地がある。

以上でまとめた予測雨量の階級平均、及び実績値のモード、上限値、下限値をプロットしたものが図-5である。図は、RSMはLT40時間、GSMはLT79時間のものを示した。○印は実績値のモード、 r_{min} 、 r_{max} を結ぶ実線は実績値の70%出現幅を示している。図においてモードが0mmを下回っている点があるが、ガンマ分布のモードを算出するとこのようなケースも起こりうる。安全側に予測することを考え、各LTにおける上限値を用いて回帰式を作成し、これを補正式とした (表-3)。

4. 積算予測雨量を用いたダム放流操作

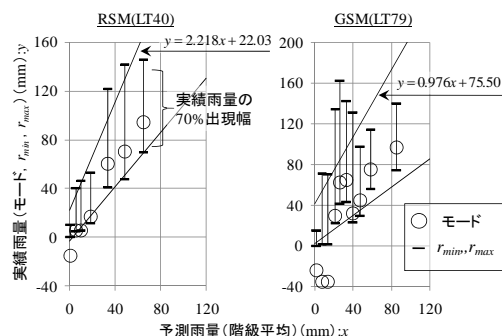


図-5 予測値に対する実績値の出現幅 左:RSM, 右:GSM

表-3 各LTに相当する予測雨量の補正式

	RSM		GSM	
	a	b	a	b
LT8	2.107	8.30	1.106	16.59
LT16	2.103	14.25	1.249	27.47
LT24	2.412	13.58	1.512	31.87
LT32	2.279	19.79	1.674	34.98
LT40	2.218	22.03	1.651	41.45
LT48			1.528	48.61
LT56			1.391	57.00
LT64			1.179	65.35
LT72			1.048	70.89
LT79			0.976	75.50

補正式

$$R = ax + b$$

R: 補正後

x: 積算予測雨量

x: 積算予測雨量

(1) 部分流出率の算定式の作成

一般に、流出率は降雨イベント全体の総雨量と総流出高の比で算出される。一方で本研究では、洪水前のある時点における各LTの積算実績雨量と積算実績流出高の比を部分流出率として定義する。すなわち、洪水前の各LTの積算雨量と各LTの積算流出高の部分的な対応を表す指標となる。また、降雨の終わり際になると積算実績雨量が小さくなることで部分流出率が1.0を超える場合がある。部分流出率が1.0を超える場合は、それまで降っていた直前の降雨の影響によるものとして、部分流出率の算定式を作成する際には除いている。部分流出率が1.0を超えることがないわけではないのでその点について留意されたい。以上で定義した部分流出率を、各LTに相当する時間間隔別に求めた。これと半減期72時間の実効雨量との相関図を図-6に、各LTの算定式と相関係数を表-4に示す。図にはLTが79時間のときの相関図を示している。図-6・表-4から、部分流出率と実効雨量は相関を有していることがわかる。以上より、表-4の算定式を用いて部分流出率を決定した。

(2) 活用容量及び活用水位の決定

次に、ダムの弾力的管理で確保する水量を決定する。洪水前には治水容量を確保する必要があるため、予測LTに応じた放流可能量を考え余裕をもった水量としなければならない。よってGSMは79時間、RSMは40時間の最長LT時に安全に事前放流できる水量を考える。金山ダムでは、ダム下流河川の流下能力から無害流量を80m³/sとしている。また洪水警戒体制に移ってから事前放流の開始までに、職員の召集や下流の警報、巡視等の準備時間に2時間を設定している。さらに操作規則上、下流の急激な水位の変動を防ぐため、放流開始後1時間

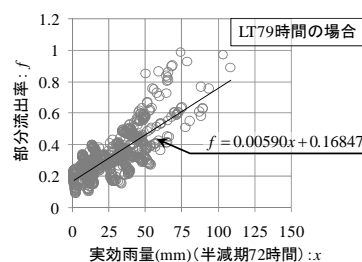


図-6 実効雨量と部分流出率の関係

表-4 各LTに相当する時間間隔別の部分流出率の算定式

	a	b	r (相関係数)
LT8	0.00361	-0.03091	0.51
LT16	0.00416	0.00176	0.66
LT24	0.00476	0.03150	0.80
LT32	0.00544	0.04909	0.81
LT40	0.00583	0.06807	0.82
LT48	0.00539	0.09980	0.83
LT56	0.00555	0.11955	0.81
LT64	0.00551	0.14133	0.80
LT72	0.00577	0.15538	0.80
LT79	0.00590	0.16846	0.79

算定式

$$f = ax + b$$

f: 部分流出率

x: 実効雨量
(半減期72時間)

迄はゲートの操作間隔を10分毎とし、1回の操作による放流量の最大増分を10m³/sとしている。以上を踏まえ、本検討では洪水警戒体制に移ってから3時間が経過した後、無害流量である放流量80m³/sを放流することとした。以上より、各LTにおいて最大の放流可能量は80m³/s×(LT-3)×3,600(s)で求められるが、平常時の流入量が10m³/s～20m³/sであるため、安全を考え放流可能量の半分を活用容量とした。つまり、GSMにおいて予測LTは79時間であるため放流可能量は21,888千m³となるが、この半分に当たる10,944千m³を活用容量とした。同様にRSMでは活用容量を5,328千m³とした。これを制限水位338.50mに上乗せし、活用水位をGSMは340.02m（制限水位+1.52m）、RSMは339.24m（制限水位+0.74m）とした。

(3) 複数のLT積算予測雨量を用いた事前放流操作

以上より、実効雨量による部分流出率の算定式を作成し、活用容量を決定したので、次に積算予測雨量を用いた事前放流操作の提案及び過去の洪水事例に適用し検討を行う。操作方法について以下に箇条書きで説明し、そのフロー図を図-7に示す。

1) 毎時間、次式より各LTの予測流入量を算出する。

$$V_{in(LT)} = f_{(LT)} \times A \times R_{(LT)} \times 10^3 \quad (3)$$

ここで、 $V_{in(LT)}$: 当該LTの予測流入量(m³), $f_{(LT)}$: 当該LTの部分流出率, A : 流域面積(470km²), $R_{(LT)}$: 当該LTの積算予測雨量(mm)

2) 次の判別式を用いて事前放流の必要性を判断する。

$$V_i + V_{in(LT)} - V_{out(LT)} \geq V_{Limit} \quad (4)$$

ここで、 V_i : t 時刻の貯水量(m³), $V_{out(LT)}$: 当該LTの放流可能量(m³), V_{Limit} : 制限水位338.5mの容量(m³).

左辺であるLTの貯水量を予測しそれが制限水位の容量を超える場合事前放流を実施することを意味する。

3) 各LTで放流可能量が違う (=低下できる水位が違う) ため、各LTの判別式に貯水位による適用範囲を定め

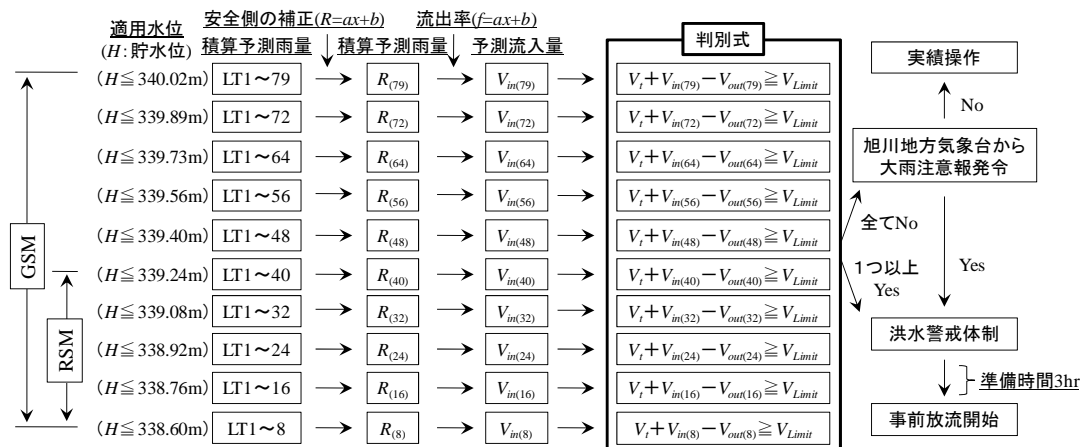


図-7 複数のLT積算予測雨量を用いた事前放流操作方法のフロー

る。すなわち制限水位まで十分に下げられる貯水位とする必要があり、前節の活用水位と同様の考え方で決定した。例えばLT79時間の判別式は貯水位340.02m以下の場合に適用する。図-7左端に各LTの適用水位を示す。

- 4) 式(4)の判別式により事前放流が必要と判定された、または気象台から大雨注意報が発令された場合、洪水警戒体制に移る。3時間の準備時間を設け、その間判別式が事前放流を判定し続けた場合、その後無害流量80m³/sで事前放流を実施する。
- 5) 事前放流を実施した後でも、判別式が事前放流を必要ないと判定した場合は実際にダムから放流された量を放流する（これを「実績操作」とする）。このとき、洪水警戒体制は解除されないものとし、再度事前放流を実施する場合には準備時間なく放流できるものとする。
- 6) 貯水位が制限水位まで下がった場合は実績操作を実施し、それで制限水位を超える場合は放流量を流入量と同量とし水位維持操作とする。

以上の操作を行い、洪水量到達時に貯水位が制限水位338.5m以下であれば、治水上の安全性を確保できたと判断する。この操作を、降雨予測の解析データに用いた事例から、7月～9月の洪水事例に対して適用し検討を行った（表-2参照）。初期貯水位は前節で示した活用水位に基づき、RSMは339.24m、GSMは340.02mとし、それぞれ洪水の40時間前、79時間前から計算を開始する。流入量、放流量は実績に基づくものとし、判別式により事前放流操作となった場合は前述の通り放流量を変化させる。以上より検討を行った結果を図-8及び表-5に示す。図は上段にRSMの事例、中段、下段にGSMの事例を示す。それぞれ上に貯水池計算、下に判別式の図を配置している。判別式の図は、各LTの判別式に基づき事前放流を実施すると判定された場合に○、実績操作と判定された場合に×を示している。また、表は事例ごとの各LTにおける予測流入量の最大値をm³/sに単位換算したものである。図によると、どの事例においても注意報の発令よりも早く洪水警戒体制に移っており、事前放流を

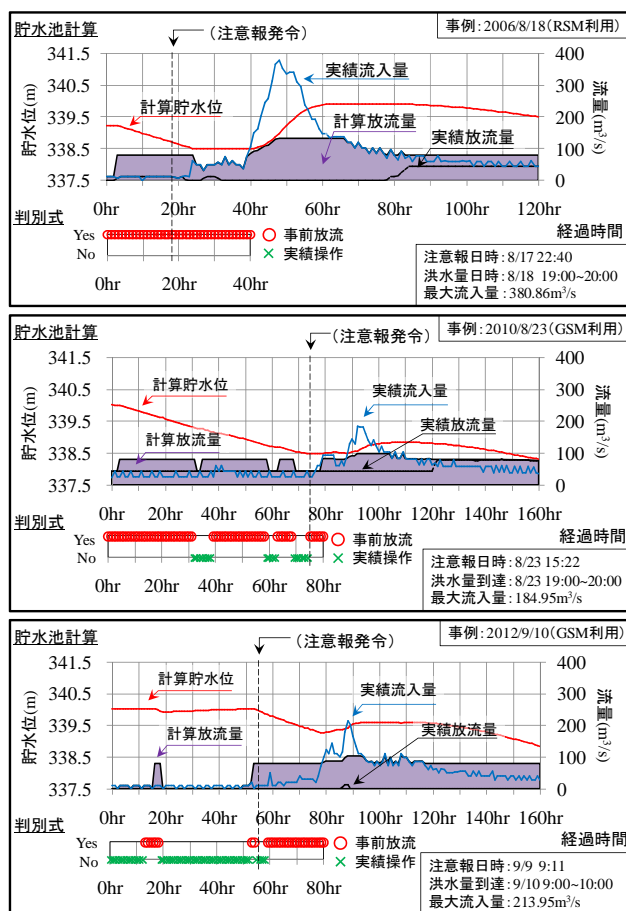


図-8 事前放流操作シミュレーション結果

表-5 事例ごとの各LTにおける予測流入量の最大値

事例	LT8	LT24	LT48	LT79
2006/8/18	202m³/s	248m³/s		
2010/8/23	89m³/s	94m³/s	115m³/s	66m³/s
2012/9/10	95m³/s	99m³/s	117m³/s	115m³/s

早期に開始できている。しかし2012年9月の事例では洪水量到達前に貯水位を制限水位まで低下できなかった。

この対策として、部分流出率を1.1倍、1.2倍と割増し、降雨に対する流入の応答を大きくすることを考えた。その結果、2012年の事例では部分流出率を1.4倍と割増した場合、早期に事前放流が実施され、洪水前に治水容量を確保することができた。その結果を図-9に示す。また、

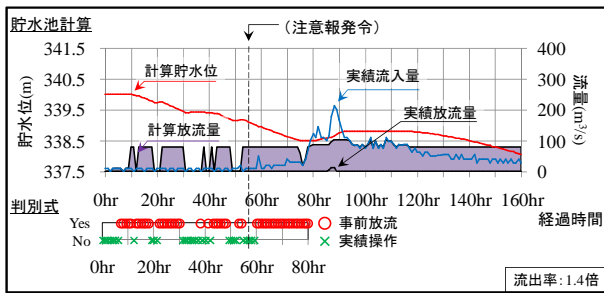


図-9 2012/9/10：部分流出率を1.4倍とした結果

表-6 事例ごとの部分流出率による対策

事例	数値予報モデル	最大流入量(m³/s)	fの割増率	割増後のf
2005/8/3	RSM	89.46	1.2倍	0.19～0.58
2005/8/22	〃	238.07	1.0倍	0.12～0.58
2005/9/7	〃	146.08	1.2倍	0.01～0.54
2006/8/18	〃	380.86	1.0倍	0.02～0.62
2008/8/4	GSM	104.19	1.0倍	0.04～0.55
2010/8/12	〃	163.61	1.0倍	0.13～0.64
2010/8/23	〃	184.95	1.0倍	0.09～0.55
2011/7/14	〃	111.11	1.0倍	0.03～0.70
2011/8/15	〃	163.63	1.4倍	0.00～0.77
2011/9/2	〃	180.56	1.0倍	0.01～0.41
2012/9/10	〃	213.95	1.4倍	0.10～0.88

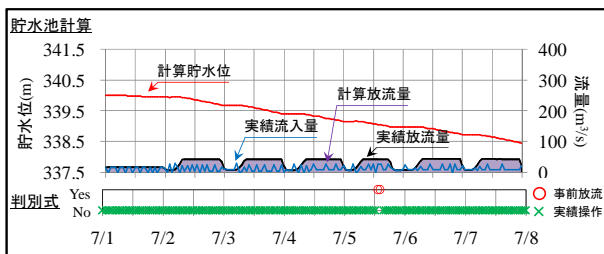


図-10 2012/7/1～7/7の貯水池計算結果（部分流出率1.4倍）

表-7 現況と本研究の運用の比較

	事前放流の基準	制限水位	活用水位	活用容量
現況の運用	大雨注意報の発令	338.5m	338.7m	1,428千m³
本研究の運用	大雨注意報の発令 積算予測雨量に基づく判別式		340.02m (GSM利用時)	10,944千m³

全ての事例の対策結果を表-6に示す。表は、事例ごとにどれだけ部分流出率を割増する必要があるかを示している。GSMの事例については部分流出率を1.4倍と割増することにより全ての事例で治水容量を確保することができた。

(4) 平常時の運用及び利用できる活用容量の検討

以上より、部分流出率を1.4倍と割増することによって洪水に対する安全性を確認することができた。しかし、部分流出率を割増することにより、予測雨量がそれほど大きくない場合でも事前放流を判定してしまう可能性がある。平常時における本研究の運用方法を検証するため、昨年2012年において弾力的管理が開始される7月1日より貯水池計算を行った。初期貯水位には活用水位である340.02m（制限水位+1.52m）を与えた。その結果が図-10である。図によると、途中判別式によって事前放流が判定され洪水警戒体制に移っているが、準備時間3hrのうちに実績操作が判定され、事前放流を実施していない。計算開始から1週間実績操作が続き、計算貯水位が制限

水位338.5mまで低下した。結果として活用水位分の活用容量を全量利用することができたと言えるが、途中事前放流が判定され事前放流する可能性があった点については、他年度においても同様に検証・考察する必要がある。

上述のとおり、2012年については事前放流によって活用容量をロスすることなく、全量利用することができた。ここで、現況の運用と本研究の運用の比較を表-7に示す。以上より、現況の活用容量の約8倍の水量を下流の河川環境改善・また小水力発電に利用できる可能性がある。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 積算予測雨量のLTを延長した場合でも、実績値と相関性を有することを示した。
 - 2) 予測雨量の誤差を定め補正式を作成した。
 - 3) 複数のLT積算予測雨量を用いた事前放流操作を提案し過去の洪水事例に適用した結果、部分流出率を1.4倍と割増することで安全性を確保できることがわかった。
 - 4) 提案した操作を平常時に適用した結果、現況の活用容量の約8倍の水量を利用できる可能性を示した。
- 降雨予測LTの延長により、ダム弾力的管理を向上させようということがわかった。今後は予測手法のさらなる改善や、他ダムへの適用性等を検討していきたい。

謝辞：本研究の一部は学術研究助成基金助成金基盤研究(C)（課題番号23560602）と平成25年度高橋産業経済研究財団の助成を受けた。また、北海道開発局金山ダム管理支所より資料の提供を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 林下直樹，中津川誠，川村一人：空知川流域を対象とした小水力発電の可能性，土木学会北海道支部論文報告集，68号，B-32，2012
- 2) 下坂将史，呉修一，山田正，吉川秀夫：既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案，土木学会論文集B，Vol.65，No.2，106-122，2009。
- 3) 臼谷友秀，中津川誠：積算予測雨量に基づいた融雪期におけるダムの洪水調節機能の向上について，土木学会論文集B，Vol.66，No.3，268-279，2010。
- 4) 林下直樹，中津川誠，臼谷友秀：多目的ダムの弾力的運用による小水力発電の可能性に関する研究，土木学会論文集B1(水工学) Vol.69，No.4，I_1675-I_1680，2013。
- 5) 国土交通省河川局河川環境課：ダムの弾力的管理試験の手引き（案），2003。
- 6) ダム操作に関する検討技術会，ダム操作の運用改善に向けた中間報告書，2012。
- 7) 気象庁HP：<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/typhoon/7-1.html> (2013. 9. 30受付)